

Impacto del envejecimiento en la mecánica del tendón de Aquiles: caracterización experimental y modelado

M. Corral-Barricarte¹, B. Calvo¹, A. Pérez-Ruiz², E. Bejarano-Fernández², J. Grasa¹

¹ Applied Mechanics and Bioengineering

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.

Tel. +34-976762707, e-mail: m.corral@unizar.es

² Departamento CC Biomédicas, Facultad de Ciencias de la Salud

Universidad CEU Cardenal Herrera, Valencia

Resumen

Este estudio analiza cómo cambia la mecánica del tendón de Aquiles con la edad en un modelo murino. Los datos experimentales se ajustan a un modelo numérico que permite evaluar el comportamiento del tendón bajo distintas velocidades de contracción, combinando ensayos y simulación para comprender mejor la mecánica tendinosa asociada al envejecimiento.

Introducción

Los tendones presentan una estructura jerárquica que permite una transmisión eficiente de la fuerza y el almacenamiento de energía. Su comportamiento mecánico es complejo, ya que integra componentes tanto elásticos como viscoelásticos dependientes del tiempo [1]. Aunque tradicionalmente el módulo de elasticidad ha sido considerado un determinante clave de la función tendinosa, evidencias recientes han puesto de manifiesto el papel fundamental de la viscoelasticidad en la transferencia de carga y la disipación de energía, así como su potencial variación con el envejecimiento [2].

Comprender la evolución de las propiedades mecánicas del tendón con la edad es esencial tanto desde el punto de vista clínico como biomecánico. Las alteraciones asociadas al envejecimiento pueden comprometer la capacidad del tendón para almacenar y liberar energía, aumentar la susceptibilidad a lesiones y modificar el rendimiento funcional del sistema musculoesquelético. En este contexto, la caracterización de estos cambios no solo permite profundizar en la fisiología del envejecimiento, sino que también facilita el desarrollo de estrategias más eficaces de prevención, diagnóstico y rehabilitación.

El objetivo de este estudio es evaluar experimentalmente cómo las propiedades elásticas y viscoelásticas del tendón se modifican con la edad, utilizando como modelo el tendón de Aquiles de ratón. Posteriormente se ha definido un modelo

numérico visco-hiperelástico para reproducir numéricamente la respuesta del conjunto tendón-músculo y poder evaluar el estado tensional en el tendón ante diferentes velocidades de contracción.

Materiales y métodos

Se realizaron ensayos de tracción uniaxial mediante aplicación de desplazamiento controlado a una velocidad constante de $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Para cada muestra, se impusieron cuatro niveles de deformación: 1.02, 1.05, 1.10 y 1.15. En cada nivel, se llevaron a cabo cinco ciclos consecutivos de carga-descarga con el fin de estabilizar la respuesta mecánica del tejido, tras lo cual se mantuvo la deformación constante durante un periodo de 1800 s para registrar la relajación de tensiones. El estudio se realizó sobre tendones de Aquiles de ratón, con un tamaño muestral de $n = 5$ por grupo, considerando cuatro grupos de edad: 1, 4, 12 y 24 meses.

Con los datos experimentales se obtuvieron tanto las curvas de relajación en tensión para los 4 niveles de deformación como las curvas λ - σ correspondientes a la respuesta pico (componente viscoelástica) como las respuestas relajadas (componente elástica) del tejido.

A partir de estas curvas, utilizando MATLAB, se ajustó un modelo visco-hiperelástico. Las curvas λ - σ se utilizaron para caracterizar la parte puramente elástica del comportamiento del tendón. Para ello se aplicó un ajuste exponencial [3], que se puede ver en la figura 1.a

De forma paralela, las curvas correspondientes a los distintos ensayos de relajación se utilizaron para ajustar un modelo viscoelástico basado en una serie de Prony, tal como se muestra en la Figura 1.b. Este procedimiento permitió obtener, para cada grupo de edad, los coeficientes de relajación y los tiempos característicos que describen la disipación temporal de la tensión. La ecuación empleada fue:

$$\sigma(t) = 1 - \sum_{i=1}^2 g_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (1)$$

En COMSOL Multiphysics se simuló la respuesta del músculo esquelético idealizado [3]. El modelo constitutivo viscoelástico específico para cada edad del tendón de Aquiles se incorporó a la simulación y, bajo patrones de estiramiento idénticos, se evaluó la respuesta mecánica correspondiente a los tres grupos de edad.

Resultados

El análisis de los resultados experimentales revela que la relajación de tensiones del tendón presenta un comportamiento marcadamente no lineal. Se observa que la magnitud de la relajación aumenta con el incremento del nivel de alargamiento impuesto, tendencia que se mantiene de forma consistente en todos los grupos de edad analizados, ver Fig 2.a. Se puede observar que la relajación para el tercer alargamiento con un mes es de un 41% mientras que en el de 24 meses para el mismo alargamiento relaja hasta un 26%.

Asimismo, el estudio de las curvas tensión–estiramiento pone de manifiesto una dependencia de la respuesta elástica con la edad, evidenciándose un aumento progresivo de la rigidez del tejido tendinoso en los grupos de mayor edad ver ver Fig 2.b. Para el alargamiento de $\lambda = 1.15$ para un mes es de 787kPa mientras que para 24 meses es de 1498 kPa.

Conclusiones

Los resultados mostraron una degradación progresiva de las propiedades elásticas y viscoelásticas del tendón con la edad. Los parámetros obtenidos a partir de los datos experimentales

permitieron ajustar modelos analíticos capaces de reproducir con precisión la respuesta mecánica del tejido y de evaluar su impacto funcional mediante simulaciones computacionales.

Las simulaciones acopladas músculo–tendón revelaron que los cambios viscoelásticos asociados al envejecimiento reducen la eficiencia en la transmisión de fuerza y modifican la dinámica temporal de la contracción, observándose en los tendones envejecidos tanto un retraso en la generación de fuerza como una disminución del pico máximo, ver Fig 1.c. En conjunto, estos resultados evidencian que el deterioro viscoelástico del tendón constituye un factor clave en la pérdida de rendimiento mecánico con la edad.

Agradecimientos

Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (Subvención PRE2023-UZ-13 y PID2023-147987OB-C31 y el Departamento de Industria e Innovación (Gobierno de Aragón) a través del grupo de investigación Subvención T24-23R.

REFERENCIAS

- [1]. SHEN, Z. L., et al., *Viscoelastic properties of isolated collagen fibrils*. Biophysical Journal, (2011)
- [2]. KARATHANASOPOULOU, N., & GANGHOFFER, J.F., *Investigating the Effect of Aging on the Viscosity of Tendon Fascicles and Fibers*. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, (2019)
- [3]. J. GRASA et al., *Active behavior of abdominal wall muscles: Experimental results and numerical model formulation*, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, (2016).

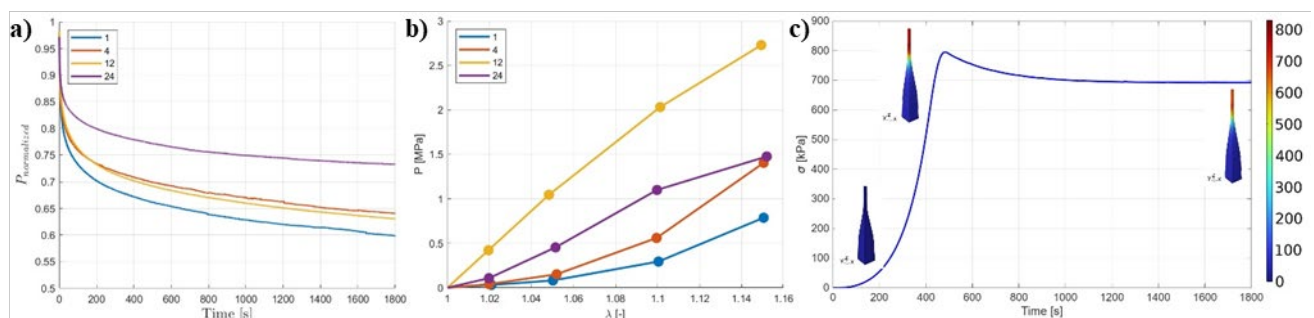


Figura 1: a) Resultados relajaciones del tendón de Aquiles para distintos grupos. b) Resultados de las curvas tensión–alargamiento del tendón de Aquiles para distintos grupos